MATHEMATICAL SCIENCES

FORECASTING THE SPREAD OF CORONAVIRUS IN RUSSIA: LIGHT AT THE END OF THE TUNNEL

Nizhegorodtsev R.
Doctor of Economics, Laboratory chief
Institute for Control Studies RAS,
Roslyakova N.
Candidate of Economics, senior researcher
Institute for Control Studies RAS,
Goridko N.
Candidate of Economics, senior researcher
Institute for Control Studies RAS,

ПРОГНОЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАВИРУСА В РОССИИ: СВЕТ В КОНЦЕ ТУННЕЛЯ

Нижегородцев Р.М.
д.э.н., заведующий лабораторией
Институт проблем управления РАН,
Рослякова Н.А.
к.э.н., старший научный сотрудник
Институт проблем управления РАН,
Горидько Н.П.
к.э.н., старший научный сотрудник
Институт проблем управления РАН,

Abstract

The paper deals with forecasting the spread of coronavirus, i.e. the number of diseased and deceased people, for the world as a whole and separately for Russia using available evidence by the tools of logistic curves. The methodology and tools of the study, the results of other forecasts, and directions for further research are discussed.

Аннотация

Статья посвящена прогнозированию распространения коронавируса, т.е. численности заболевших и умерших, для мира в целом и отдельно для России на основании имеющихся фактических данных при помощи инструментария логистических кривых. Обсуждаются методология и инструментарий исследования, результаты других прогнозов и направления дальнейших исследований.

Keywords: coronavirus, modeling and forecasting, logistic curves, measures to counter the spread of the epidemic.

Ключевые слова: коронавирус, моделирование и прогнозирование, логистические кривые, меры противодействия распространению эпидемии.

Введение

Цель работы заключается в том, чтобы спрогнозировать развитие событий с эпидемией коронавируса для мира и для России, а именно – оценить перспективную динамику численности заболевших и умерших от коронавируса. В момент написания статьи динамика для России еще показывает экспоненциальный рост, и одна из задач заключается в том, чтобы понять, когда следует ожидать стабилизации численности заболевших и умерших (так называемый выход на «плато»), и приблизительно в какие сроки эпидемия ощутимо пойдет на спад.

Количество жертв при катастрофах любого происхождения представляет собой случайную величину, которая характеризуется распределением с «тяжелыми» хвостами [1], т.е. сколь бы искусным ни было человечество в предотвращении катастроф и в ликвидации их последствий, в любой момент можно ожидать наличия аномально высоких выбросов количества пострадавших, и наличие этих выбросов обусловлено уникальностью развертывающейся ситуации.

А тот факт, что поводов для этих ситуаций предоставляется более чем достаточно, многократно обосновывался специалистами прежде всего в области безопасности, причем различных ее аспектов – от экономических до медико-биологических [2].

Поэтому следует согласиться с мнением Нассима Талеба о том, что эпидемия коронавируса была в целом предсказуема и ее нельзя считать «черным лебедем» [3], - тем более, что аналогичные заболевания, в том числе разные формы гриппа (пусть не столь разрушительные), сопровождали развитие глобальных процессов в течение последних 20 лет.

Краткий обзор возможных подходов

Наиболее распространенный аппарат изучения распространения вирусных заболеваний – это так называемые имитационные SEIR-модели, согласно

которым население исследуемой страны или региона разделяется на 4 категории: S - susceptible (подверженные заражению, уязвимые), E - exposed (выявленные переносчики вируса, не требующие медицинской помощи, - например, бессимптомно болеющие), I - infected (больные, которым требуется помощь), R - resistant (устойчивые к заражению).

Традиционные SEIR-модели предназначены для моделирования распространения инфекционных заболеваний в замкнутых сообществах. Некоторые исследователи справедливо указывают на то, что как страновая, так и мировая статистика не делает различий между заболевшими за рубежом (и уже после этого въехавшими в страну) и заразившимися внутри страны [4]. Между тем, эта разница существенна с точки зрения оценок скорости распространения вируса на той или иной территории.

Большинство построенных в мире прогнозных моделей распространения коронавируса предполагает опору на «натуральные» параметры, характеризующие быстроту заражения, уровень летальности вируса, плотность взаимных контактов между людьми и т.д. (см. [5-7] и др.).

Заслуживают внимания модели, которые учитывают, в частности, долю пожилого населения (поскольку оно наиболее подвержено опасности заражения), плотность населения на территории, где изучается распространение вируса, и др., а различия между сценариями связаны с продолжительностью ограничительных мер и со степенью мягкости социальной изоляции (от этих параметров зависит процент прерывания так называемых цепочек заражения) [8].

Существуют и «территориально ориентированные» модели распространения эпидемии – даже не по странам, а по отдельным локальным территориям (в частности, муниципалитетам) и даже населенным пунктам с учетом плотности населения и густоты транспортной сети [9].

Наконец, интересен «апокалиптический» прогноз, согласно которому доверять официальной статистике заражений вообще нельзя, поскольку нет здоровых людей, есть плохо обследованные. Автор прогноза исходит из того, что практически все население Земли, за небольшим исключением, должно переболеть вирусом – суммарно 7,75 млрд. чел. [10]. Обратим внимание на то, что, по расчетам автора, в этом (отнюдь не оптимистичном) случае пандемия «затихнет» примерно 26 июня, после чего количество заболевших в мире перестанет расти. Правда, автор данного подхода не предполагает возможности повторных заражений, тогда как в реальности такие случаи наблюдаются – впрочем, на данный момент их количеством пока что можно пренебречь.

Методология и инструментарий

Распространение вируса представляет собой типичный пример кумулятивного роста с насыщением, т.е. вначале количество зараженных и умерших растет пропорционально уже имеющемуся их количеству, но по мере приближения к некоторому верхнему пределу этот процесс замедляется, наступает насыщение, и в конце концов он останавливается совсем. Процессы такого рода моделируются при помощи обобщенных логистических кривых.

В качестве фактора, затрудняющего проведение объективного анализа (а тем более – получение релевантного прогноза), следует упомянуть условность имеющихся фактических данных о количестве заболевших и умерших и несопоставимость этих данных по странам. Малое количество заболевших в той или иной стране может быть связано с несовершенством процедуры выявления больных либо с элементарным дефицитом тестов. Количество смертных исходов также поддается манипуляции в зависимости от того, считать ли жертвами коронавируса людей, умерших от сопутствующих хронических болезней, обострение которых наступило в результате заражения.

Именно поэтому нами в качестве инструмента моделирования была выбрана логистическая (S-образная) кривая, зависящая только от одного экзогенного параметра – от времени – и позволяющая на основе анализа временного ряда, содержащего достаточное количество наблюдений, прогнозировать дальнейшее поведение объясняемой переменной, в том числе верхний предел распространения вируса. Это типичная модель, описывающая динамику численности популяций или различные поведенческие процессы.

Модели такого рода относительно безразличны к качеству исходных статистических данных. Важным является лишь предположение о сопоставимости этих данных на протяжении периода наблюдения, о неизменности методики их расчета и о стабильности принципов поведения наблюдаемого объекта. Условно говоря, если мы моделируем численность популяции волков, то мы можем не видеть, скажем, четвертую часть этой популяции, просто не иметь в виду ее наличия и не учитывать в модели, но мы должны изначально отвергнуть возможность перехода волков на вегетарианское питание, когда они начинают щипать травку вместо того, чтобы резать овец, как это было прежде, на протяжении наблюдаемой части динамического ряда.

Кроме того, логистические модели имеют бесспорное преимущество перед классическими SEIR-моделями, состоящее в том, что официальные данные о численности заболевших и умерших по каждой стране, охваченной вирусом, подаются ежедневно, пусть даже эти данные небезупречны, поэтому для построения логистического тренда мы быстро набираем динамический ряд из ежедневных наблюдений, достаточный для построения релевантной модели, тогда как сведения о количестве потенциально подверженных риску заболеть и о количестве устойчивых к вирусу людей с такой частотой просто не нужны для практических целей. Поэтому авторы SEIR-моделей в своем подавляющем большинстве оперируют не наблюдениями как таковыми, а домыслами, пусть даже качественно сформированными и имеющими под собой некоторое основание.

Фактические данные о численности заболевших и умерших взяты с электронных ресурсов [11-13].

Изначальная спецификация модели описывается *обобщенной* логистической кривой. Эта функция удовлетворяет дифференциальному уравнению:

$$\frac{dy}{dt} = f(t)*(y-k_1)*(k_2-y), \quad (1)$$

где $y(t)$ значение результирующей функции (объясняемой переменной); t – экзогенная переменная времени (периоды от 1 до i); k_1 – нижняя асимптота, т.е. предел, с которого начинается рост функции; k_2 – верхняя асимптота логистической кривой, $f(t)$ – весовая функция, в простейшем случае равная константе.

Решением данного уравнения служит функция

$$y(t) = k_1 + \frac{(k_2-k_1)\Theta(t)}{\Theta(t)+b} \quad (2)$$

при произвольном $b > 0$, где

$$\Theta(t) = \exp\left[(k_2-k_1)\int_{t_0}^{t} f(w)dw\right]$$

В рассматриваемой модели время течет не линейно, а в некотором смысле пропорционально функции $f(t)$. Поэтому вид функции $y(t)$ существенно зависит от функции $f(t)$. Простейший случай $f(t)$ = *const* приводит к модели Ферхюльста, и мы остановимся пока что именно на ней.

Решением данного дифференциального уравнения является функция вида

$$Y(t) = \frac{k_2-k_1}{1+10^{a+bt}} + k_1 \quad (3)$$

где искомые параметры a и b определяют крутизну наклона и положение точки перегиба логистической кривой.

При допущении о том, что k_1=0, то есть рост оцениваемой функции начинается с нулевого уровня, уравнение (3) примет вид:

$$Y(t) = \frac{k_2}{1+10^{a+bt}} \quad (4)$$

С помощью нелинейного моделирования в программном комплексе Statistica методом наименьших квадратов оцениваются параметры уравнения a, b, k_2.

Результаты расчетов для всего мира

Согласно модели вида (4) для совокупного количества умерших (Death) получились оценки:

Модель: death=k/(1+(10^(a+b*t))) 81 набл. Зав. пер.: Death
Потери: (OBS-PRED) **2 Итоговые потери: 106521033,21
R= ,99920 Объяснён. дисперс.: 99

	k	a	b
Оценка	203956,5	4,562701	-0,057681

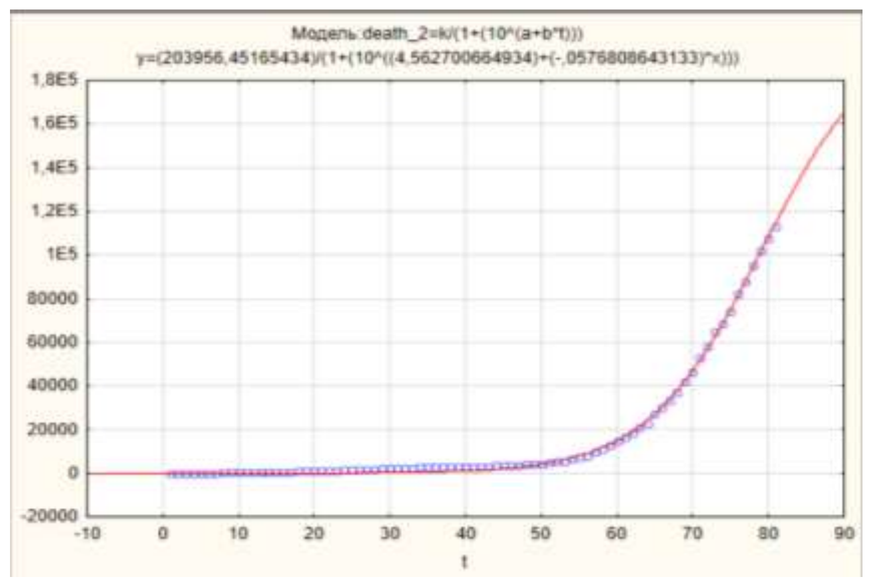


Рисунок 1. График по полученной спецификации (красный) и реальные данные (синие) для параметра Death по всему миру

В результате аппроксимации данных (81 наблюдение) логистической кривой вида (4), представленной на рис. 1, получаем формулу зависимости смертности от времени:

$$Y = \frac{203956{,}5}{1+10^{4{,}562701-0{,}057681t}} \quad (5)$$

Коэффициент детерминации данной модели с точностью до одной тысячной равен единице. Прогнозируя по ней дальнейший ход событий, получаем картину, представленную на рис. 2. Обратим внимание на то, что совокупное количество жертв коронавируса по всему миру, согласно построенной модели, не должно превысить 204 тысяч человек. По данным на 17 апреля 2020 года количество умерших едва превысило 100 тысяч человек [14]. В этом смысле построенный прогноз не является слишком оптимистичным: впереди еще больше половины жертв от пандемии.

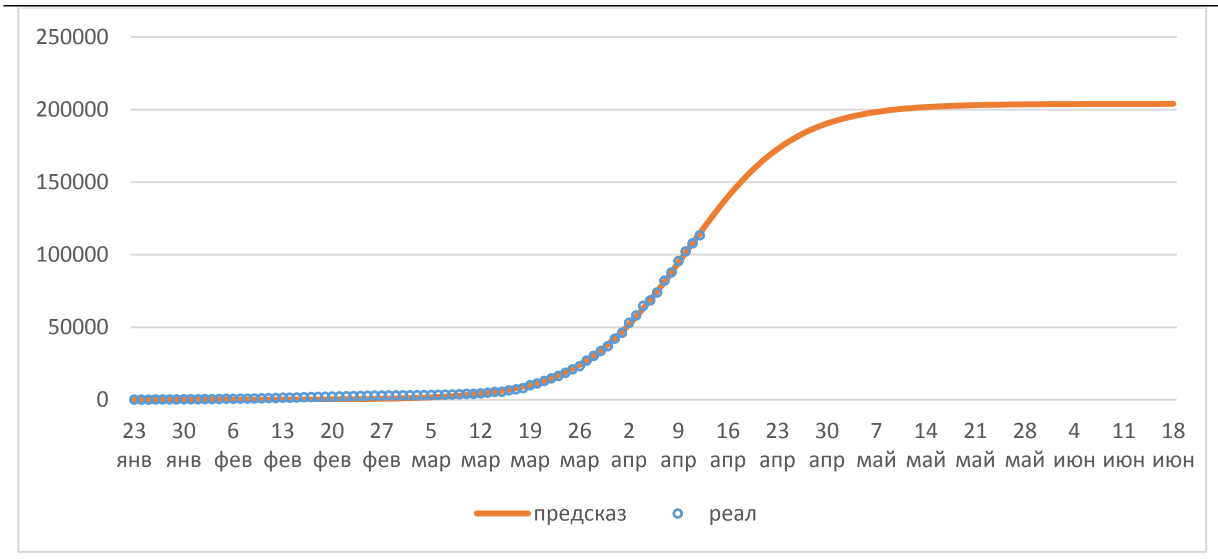


Рисунок 2. Прогноз параметра Death по всему миру

Теперь в роли объясняемой переменной $Y(t)$ возьмем общую численность заболевших по всему миру (Morbid). В соответствии с формулой (4) получаем оценки:

Модель: morbid=k/(1+(10^(a+b*t))) 71 набл. Зав. пер.: Morbid
Потери: (OBS-PRED)**2 Итоговые потери: 1040591211E2
R= ,99772 Объяснён. дисперс.: 99

	k	a	b
Оценка	2989312	3,443649	-0,050681

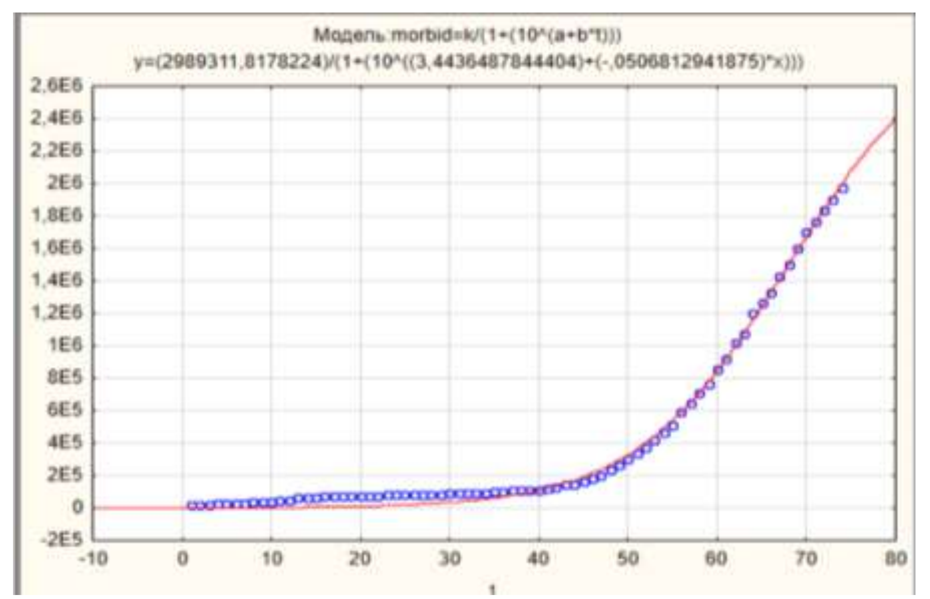


Рисунок 3. График по полученной спецификации (красный) и реальные данные (синие) для параметра Morbid по всему миру

Получаем формулу зависимости заболеваемости от времени:

$$Y = \frac{2989312}{1+10^{3,443649-0,050681t}} \qquad (6)$$

Аппроксимационный тренд представлен на рис. 3. Прогнозируя с его помощью общемировую численность заболевших коронавирусом, получаем картину временно́й динамики, изображенную на рис. 4.

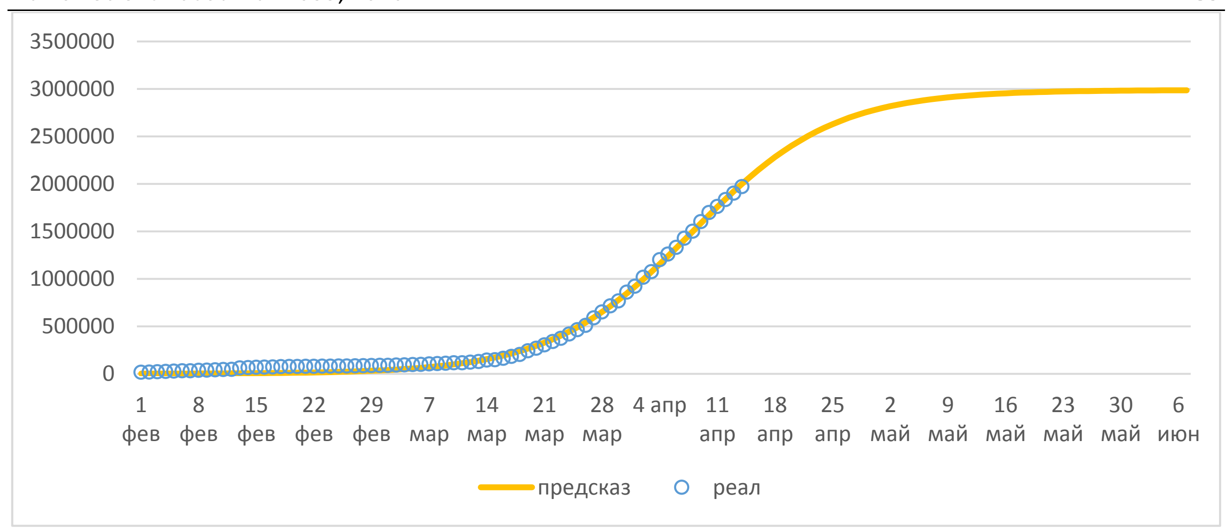


Рисунок 4. Прогноз параметра Morbid для всего мира

Представленный прогноз следует считать скорее оптимистичным в силу очевидных причин, вытекающих из методологии расчета.

При всей условности SEIR-моделей, переносящих опыт одних стран на динамику заболеваемости и смертности в других, обычные логистические модели также не свободны от этого недостатка, поскольку они исходят из предположений об *аналогичном* поведении агентов по всему миру и примерно одинаковых возможностях борьбы с вирусом, что, разумеется, неверно. Например, динамика числа заболевших во всем мире в данный момент ограничивается в основном населением развитых стран, между тем как в развивающихся странах, где серьезных вспышек эпидемии еще не было, ситуация с медицинской помощью обстоит отнюдь не так благополучно. Об этом уже свидетельствует, в частности, опыт Эквадора, и это наверняка не последняя страна, где подобные вспышки неизбежны.

С учетом данного обстоятельства сделанные прогнозы, вероятно, придется в дальнейшем скорректировать в неблагоприятную сторону. По крайней мере, комитеты и комиссии ООН, которые занимаются прогнозами такого рода, ожидают неблагополучного развития событий во многих развивающихся странах [15].

Результаты расчетов по Китаю

Из графиков, построенных по общемировым данным, видно, что процесс заболеваемости и смертности от коронавируса находится в середине фазы подъёма. Про этом потребность проверить полученные оценки наводит на мысль обратиться к данным по Китаю, где процесс смертности и заболеваемости уже вышел на плато. Основная идея состоит в том, чтобы взять «усечённые» данные Китая, также примерно до середины фазы подъёма, построить аналогичный прогноз и сравнить с реальными данными (данные по Китаю представлены на рис. 5). Однако следует обратить внимание на то, что в Китае крайне слабо представлены данные о начальной фазе медленного роста, и этот факт обуславливает отличия процесса калибровки моделей по Китаю от калибровки аналогичных моделей, построенных для всего мира.

Имеющиеся пробелы обусловлены преимущественно тем, что в Китае обнародование соответствующих данных о начальной фазе развития эпидемии наступило слишком поздно. Уже в апреле число умерших от коронавируса в Ухане (и, следовательно, в Китае в целом) было пересчитано и в результате суммарно было увеличено на 1,2 тысячи человек [16]. Разумеется, оценки параметров тренда, проводимые по недостоверным наблюдениям, порождают неточности прогнозируемых верхних пределов трендовых логистических кривых. Искажения информации объясняются несвоевременным предоставлением данных медицинскими учреждениями, работавшими с полной нагрузкой и не всегда обладавших возможностью вовремя и в полном объеме предоставлять необходимые данные.

Заслуживает внимания тот факт, что уже на второй неделе ноября 2019 года американская разведка подготовила секретный доклад о возможной эпидемии в Китае, поставив об этом в известность также структуры НАТО и Израиль [17]. В то же время, власти Китая объявили о серьезной опасности только 31 декабря, когда в одном только Ухане, согласно неофициальным данным, было уже около 3 тысяч заболевших. Поэтому по Китаю приходится довольствоваться неполными и не вполне достоверными динамическими рядами.

В качестве примера отметим, что 2 февраля была построена прогнозная математическая модель распространения коронавируса в отдельно взятом городе Ухань. 22 марта количество зараженных втрое превысило прогнозное значение, полученное согласно этой модели [18].

С учетом указанных обстоятельств выясним, какое количество исходных наблюдений для Китая окажется достаточным для построения по ним реалистичных моделей количества умерших и заболевших.

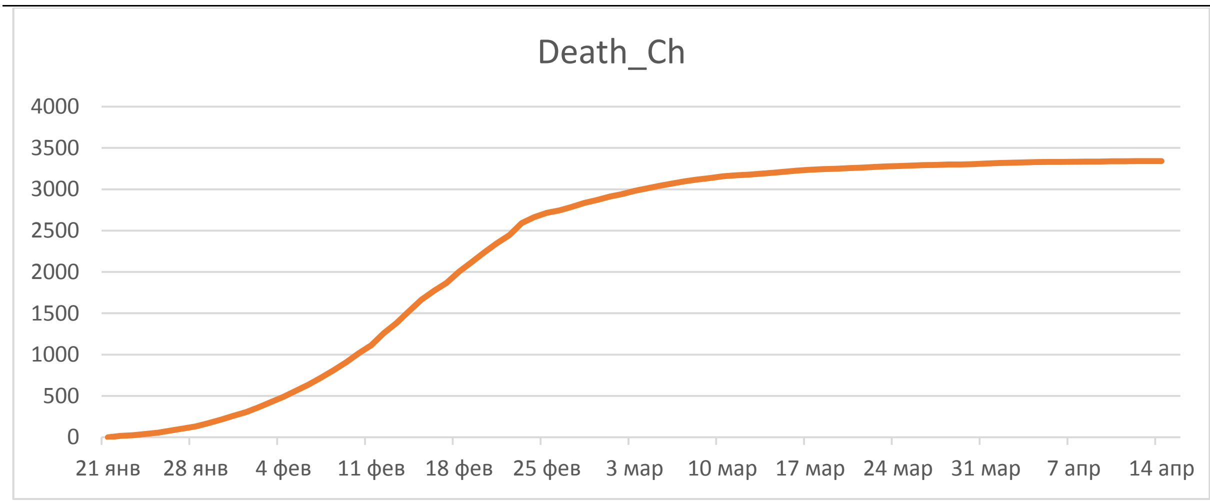


Рисунок 5. Данные о количестве умерших от коронавируса в Китае

Из рис. 5 видно, что середина фазы подъёма приходится примерно на 13-15 февраля, поэтому для построения прогноза возможно взять первые 24 наблюдения, а затем постепенно увеличивать количество исходных наблюдений, добиваясь более точных прогнозных оценок. В результате получаем следующие оценки параметров логистической функции (табл. 1).

Таблица 1

Оценка параметров логистической функции для численности умерших (Death) в зависимости от количества наблюдений (на данных Китая)

Количество исходных наблюдений	Параметры			Относительная погрешность прогноза для k
	k	a	b	
24	2183.238	1.845963	-0.085723	34,5%
31	2922.856	1.868036	-0.076179	12,5%
32	2980.318	1.864724	-0.075314	10,8%
33	3024.658	1.861361	-0.074618	9,5%
34	3124.512	1.852440	-0.073025	6,5%
35	3176,913	1,847172	-0,072183	4.9%

Прогноз на основе формулы, полученной исходя из 24 наблюдений, представлен ниже (рис. 6). Получаем формулу зависимости смертности в Китае от времени:

$$Y = \frac{2183.238}{1+10^{1.845963-0.0857231t}} \quad (7)$$

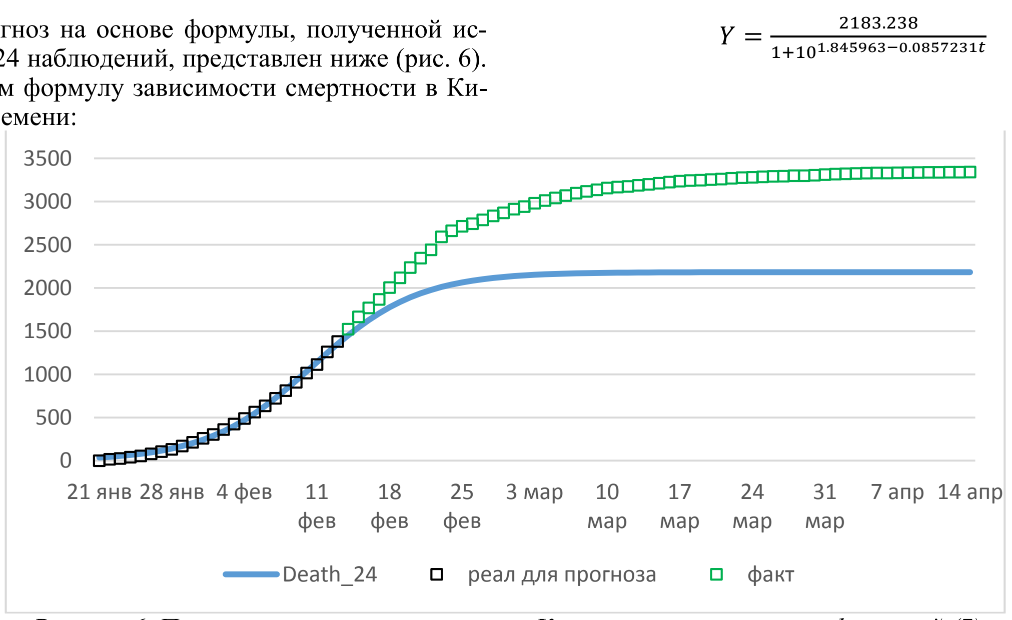


Рисунок 6. Прогноз численности умерших в Китае в соответствии с формулой (7)

Можно видеть, что точность прогноза низкая (она отмечена в табл. 1), причем прогноз оказывается ниже реальных данные примерно на 1000 человек. Поэтому мы поставили вопрос о достаточности наблюдений для получения относительно точного прогноза. Через итерационную процедуру с последовательным включением на каждом этапе одного дополнительного наблюдения мы получили, что с 31-32-го дня становится возможным получить относительно точный прогноз (они представлены на рис. 7).

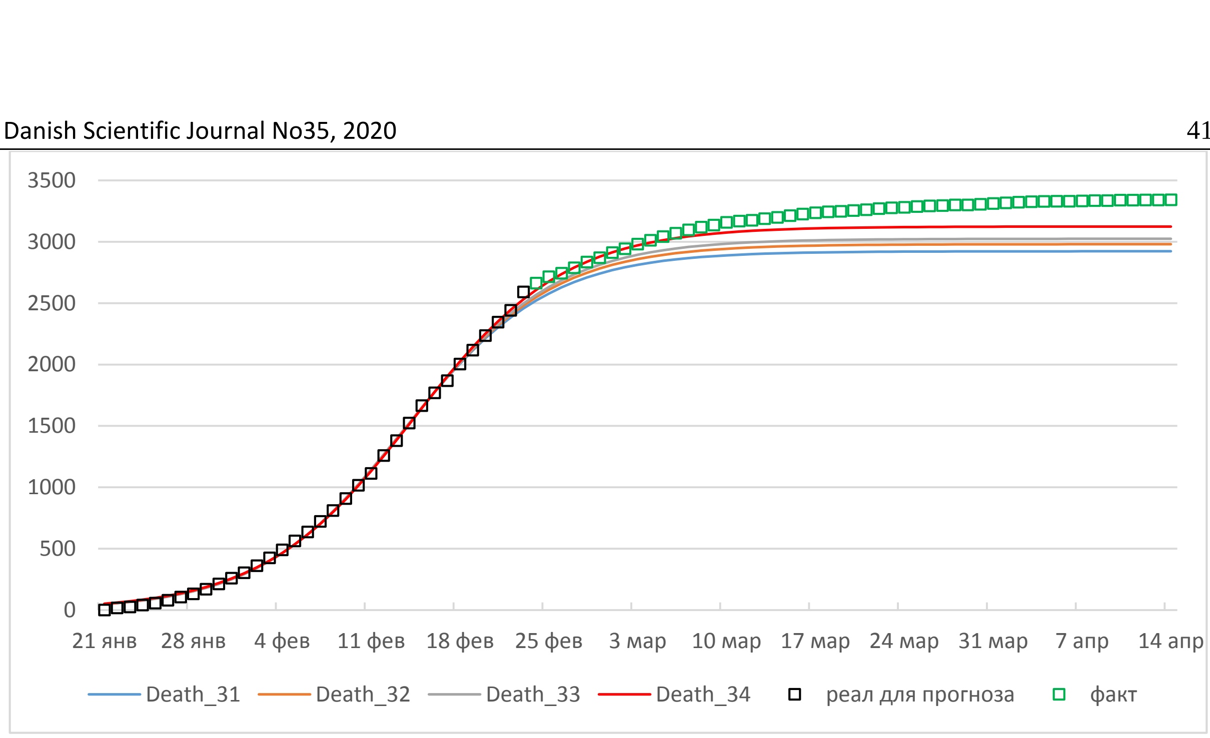


Рисунок 7. Прогнозы по численности жертв коронавируса в Китае

Все прогнозы, построенные по официальным статистическим данным, оказались заниженными. Реальное количество умерших неизменно оказывается выше прогнозного значения верхней асимптоты.

Заметим, что по мере увеличения числа наблюдений, учитываемых при построении модели для численности жертв коронавируса, амплитуда k трендовой логистической кривой неизменно растет, а ее «крутизна» (максимальная скорость роста), пропорциональная модулю параметра b, снижается (см. табл. 1).

Теперь модели для заболеваемости в Китае.

Тренд, построенный по сокращенному ряду, состоящему из первых 24 наблюдений, дает завышенный прогноз (данные представлены на рисунке 8). Сам тренд описывается формулой (8):

$$Y = \frac{94572.5874947719}{1+10^{1.694799-0.084128895t}} \tag{8}$$

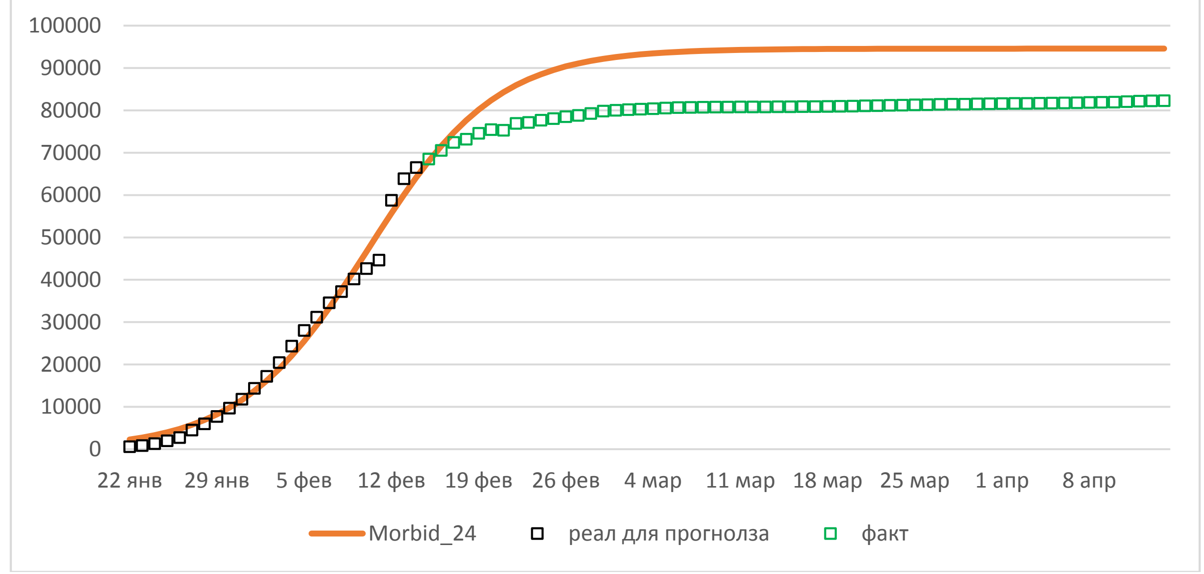


Рисунок 8. Прогноз по заболеваемости в Китае по формуле (8)

А вот формула (9), рассчитанная по данным 31 наблюдения, т.е. по данным за месяц, дает весьма точную картину (рис. 9).

$$Y = \frac{83209.46382}{1+10^{1.744686-0.093511t}} \tag{9}$$

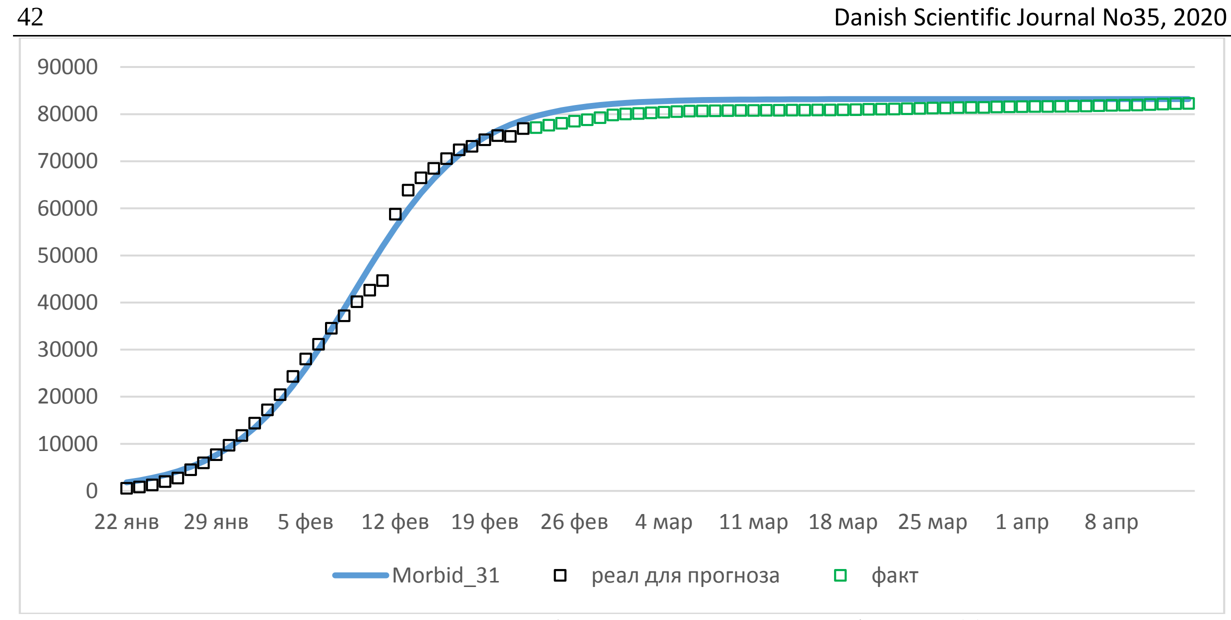


Рисунок 9. Прогноз по заболеваемости в Китае по формуле (9)

Можно видеть, что даже при недостаточности (и в каком-то смысле низкой достоверности) данных о фазе медленного роста все же возможно построить относительно точные асимптотические прогнозы, обладая данными о динамике процесса за месяц и более.

Результаты расчетов для России и обсуждение

Очевидно, что для России имеются достаточно валидные данные о первой фазе медленного роста. Поскольку активное развертывание эпидемии произошло относительно недавно, мы не имеем достаточно большого массива данных, на основании которых можно было бы сделать вполне достоверный прогноз. К настоящему моменту имеются данные о заболеваемости за 61 период (с 14 февраля) и данные о смертности за 29 периодов (с 17 марта). Полученные по этим данным тренды представлены формулами (10) и (11), а соответствующие им прогнозы изображены на рисунках 10 и 11.

$$Death_{Ru} = \frac{621.733}{1+10^{2.773-0.0809t}} \qquad (10)$$

$$Morbid_{Ru} = \frac{81543.445}{1+10^{5.145-0.0768t}} \qquad (11)$$

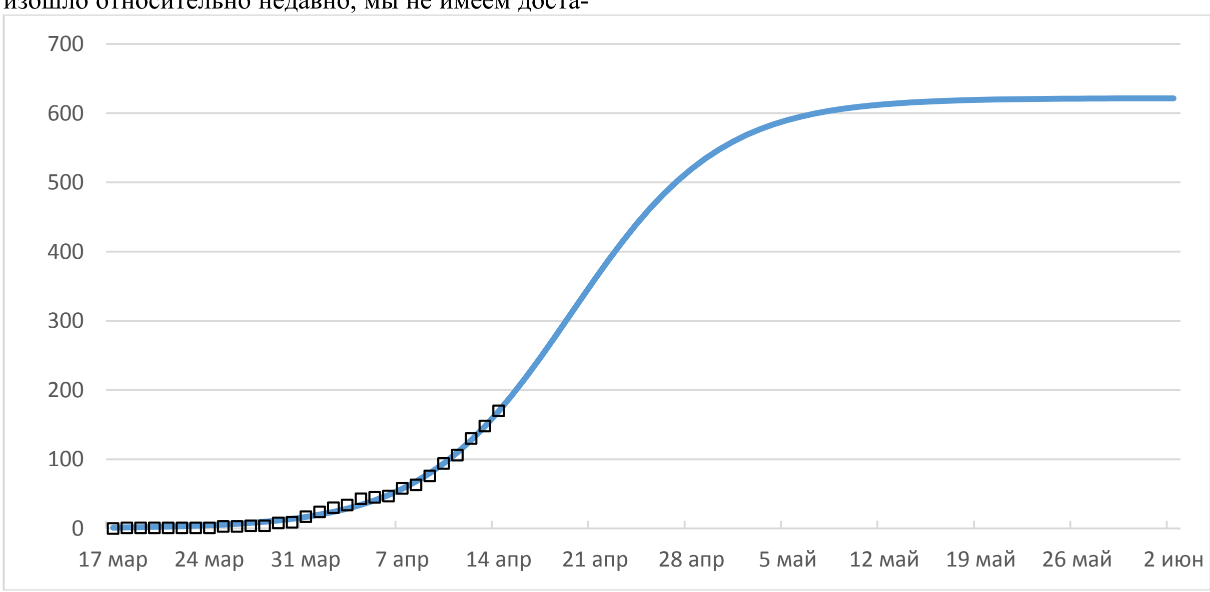


Рисунок 10. Прогноз по смертности в России по формуле (10)

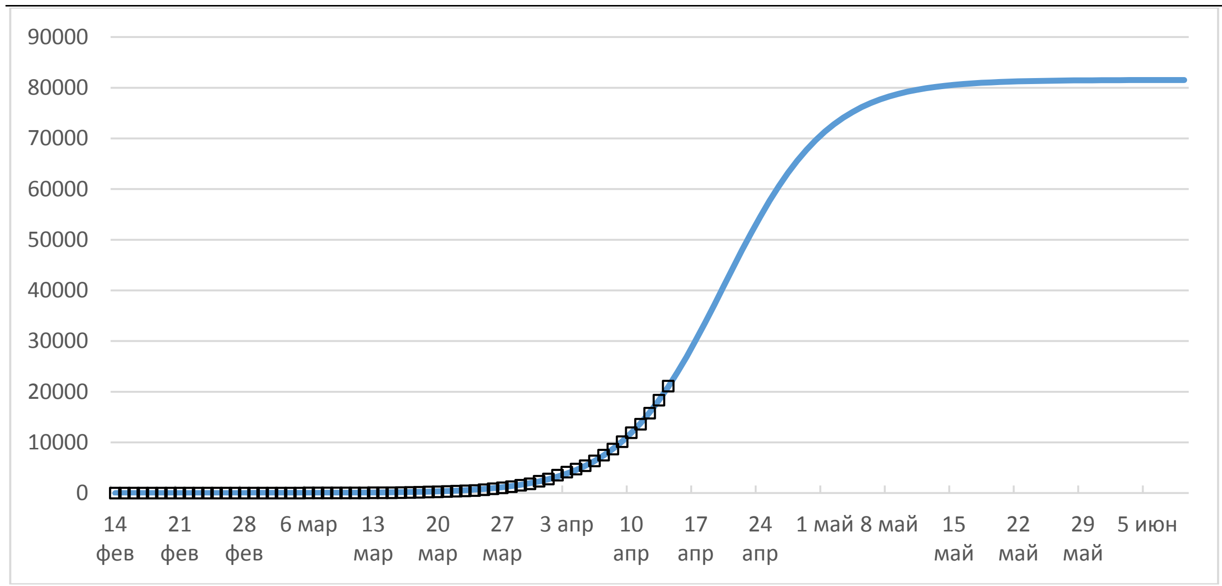


Рисунок 11. Прогноз по заболеваемости в России по формуле (11)

Из построенных графиков видно, что неделя с 20 по 26 апреля должна быть переломной. Максимальный прирост заболеваемости (точка перегиба кривой на рис. 11) ожидается вблизи 20-22 апреля, максимальный прирост смертности (точка перегиба кривой на рис. 10) приходится на 22-23 апреля. Этот факт вытекает из того, что точка перегиба кривой Ферхюльста вида (4) имеет абсциссу $t = -a/b$.

Еще спустя примерно месяц прирост как числа умерших, так и инфицированных в стране прекратится.

Резкий спад скорости приращения как заболевших, так и умерших от коронавируса в России можно ожидать в районе 1 мая – приблизительно на эту дату приходится период максимальной мгновенной кривизны трендов (10) и (11), иначе говоря – корень третьей производной соответствующих логистических функций.

Представленные прогнозы заболеваемости и смертности по России следует оценивать как оптимистические в том смысле, что они не предполагают возникновения повторных волн эпидемии, но на то нам и функция $f(t)$ в формуле (1), чтобы можно было моделировать и такие варианты. Сейчас пока рано оценивать вероятность и приблизительные сроки возможных повторных заражений, если вообще таковые будут.

Член-корреспондент РАН Симон Мацкеплишвили спрогнозировал пик эпидемии в России, который, по его мнению, придется на майские праздники, а в середине июля и в начале августа в мире и в России уже будет перелом [19]. Оставшиеся очаги инфекции к этому времени будут точечно тушиться. Известный вирусолог Михаил Щелканов также называет контрольной точкой конец апреля – начало мая, после чего станет ясен сценарий, по которому развивается эпидемия в России [20].

Консалтинговая компания Boston Consulting Group (BCG), сделавшая прогноз развития эпидемии по 20 странам, также утверждает, что пик эпидемии в России придется на первую неделю мая. Подробности прогноза по всем 20 странам можно найти в [21].

Наконец, один из пессимистических прогнозов заключается в том, что в соответствии с моделью распространения коронавируса, подготовленной аналитиками Сбербанка России и представленной в начале марта, нас ожидает «двухволновое» распространение эпидемии: летом оно замедлится, а осенью текущего года наступит вторая волна [22]. Эта модель представляет собой модифицированный вариант модели, разработанной группой ученых из Северо-Восточного университета в Бостоне и ориентированной на прогноз эпидемии гриппа H1N1 для США.

Однако заметим, что на Россию трудно клишировать сценарии развития эпидемии, характерные для других стран. Одна из причин этого факта заключается в массовой и успешной профилактике инфекционных заболеваний – в частности, это обязательная массовая прививка населения от туберкулеза (так называемая БЦЖ). Эпидемиологи упоминают этот факт в качестве одного из объяснений того, почему в России непропорционально велик (по сравнению с большинством других стран) процент людей, перенесших коронавирус сравнительно безболезненно, без наличия ярко выраженных симптомов. Этим же фактом объясняется радикально различающийся охват населения эпидемией в восточных и западных землях Германии.

Перспективы дальнейших исследований

Разумеется, основное направление дальнейших исследований лежит в плоскости построения страновых прогнозов. Один из толковых, профессионально сделанных прогнозов такого рода, разработанный специализированной рабочей группой Национальной Академии наук Украины [4], показывает, что процесс распространения эпидемии гетероскедастичен, т.е. разброс значений количества заболевших и умерших в тот или иной временной период зависит от степени отдаленности этого периода от первых дней заражения. Вблизи пика за-

болеваемости имеем «пучок» расходящихся прогнозных траекторий, которые затем начинают «собираться» вокруг определенного аттрактора в соответствии с динамикой фактических данных.

Наиболее часто встречающееся недоразумение по страновым прогнозам заключается в том, что модели, откалиброванные по данным одних стран, пытаются применить к другим и сделать по ним прогноз. В частности, нейронная сеть, обученная на примере распространения эпидемии в Китае, для некоторых авторов служила инструментом прогноза по другим странам мира [23].

При прогнозировании распространения вируса исследователи зачастую опираются на опыт Китая, ошибочно предполагая, что течение процесса в других странах и отдельных регионах пойдет по тому же сценарию [24]. При этом упускается из виду тот факт, что власти разных стран (а в некоторых странах – даже отдельных регионов) исповедуют различные подходы к борьбе с коронавирусом – от полного отказа принимать меры (как минимум на начальных стадиях, например, в Беларуси или Швеции) до всеобщего карантина.

Желание «обучить» имитационную модель на фактических данных Китая вполне объяснимо, поскольку именно в этой стране раньше, чем в других, началась исследуемая эпидемия, раньше она и заканчивается. Однако ход течения эпидемии может сильно различаться по странам. Помимо этого, по смертности и заболеваемости в Китае, как уже говорилось, для расчетов берутся не вполне достоверные данные, поэтому модели, принимающие во внимание параметры построенных трендов, не могут служить надежным эталоном для анализа динамики по другим странам.

Со страновым анализом и прогнозом тесно связан вопрос об эффективности мер, принимаемых правительством той или иной страны в русле борьбы с распространением коронавируса. Любое правительство заинтересовано в том, чтобы максимально оттянуть пик эпидемии, снизить скорость распространения вируса и уменьшить суммарное количество инфицированных и умерших.

Существует экспертное мнение, что эпидемиологический цикл коронавируса составляет 70 дней независимо от шагов, предпринимаемых (или не предпринимаемых) правительством [25]. Тем не менее, на медицинские реальности наслаиваются вводимые исполнительной властью ограничительные меры, позволяющие прервать цепочки распространения эпидемии. Именно своевременность и правильность принимаемых решений позволяет снизить численность инфицированных и умерших на отдельно взятой территории.

Возможно, когда по разным странам накопится достоверная статистика, позволяющая описать распространение эпидемии в них значимыми логистическими моделями вида (4), тогда и представится возможность кластеризовать эти страны в зависимости от трех параметров: 1 - степень охвата населения эпидемией (отношение k_2 к численности населения страны), 2 – максимальная скорость распространения эпидемии (она пропорциональна модулю b) и 3 – близость или отдаленность пика эпидемии ($-a/b$) от ее начала, причем каждый из этих трех параметров следует измерять по обеим кривым – заболеваемости и смертности. В зависимости от значений соответствующих шести параметров можно делать выводы об эффективности государственной политики по борьбе с вирусом, о степени сознательности населения и его готовности к отражению угрозы, и т.д.

Разумеется, нельзя забывать о том, что на каждый из указанных параметров воздействует множество разных факторов, и что существуют иные количественные индикаторы (помимо шести упомянутых), при помощи которых можно выразить уровень адекватности и своевременности принимаемых правительством мер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Малинецкий Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент: Введение в нелинейную динамику. М.: Наука, 1997. – 254 с.
2. Нижегородцев Р.М. Эра катастроф: техногенные мутации и проблема биоразнообразия// Глобализация экономики и российские производственные предприятия: Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010. — С. 4-8.
3. Пятин А. «Можно было предотвратить»: Нассим Талеб отказался считать коронавирус «черным лебедем» // Форбс [Электронный ресурс, 30.03.2020]. - URL: https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fwww.forbes.ru%2Fnewsroom%2Ffinansy-i-investicii%2F396483-mozhno-bylo-predotvratit-nassim-taleb-otkazalsya-schitat.
4. Прогноз розвитку епідемії COVID-19 в Україні в період 13-20 квітня 2020 р. та аналіз можливих сценаріїв розвитку епідемії в період 20 квітня - 30 травня 2020 р. [Электронный ресурс, 13.04.2020]. - URL: http://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2020/04/200417190719103-9588.pdf.
5. Zhou Tang, Xianbin Li, Houqiang Li. Prediction of New Coronavirus Infection Based on a Modified SEIR Model // BioRxiv, March 06, 2020. DOI: 10.1101/2020.03.03.20030858.
6. Juergen Mimkes, Rainer Janssen. On the corona infection model with contact restriction // BioRxiv, April 11, 2020. DOI: 10.1101/2020.04.08.20057588.
7. Pramit Ghosh, Salah Basheer, Sandip Paul, Partha Chakrabarti, Jit Sarkar. Increased Detection coupled with Social Distancing and Health Capacity Planning Reduce the Burden of COVID-19 Cases and Fatalities: A Proof of Concept Study using a Stochastic Computational Simulation Model // BioRxiv, April 07, 2020. DOI: 10.1101/2020.04.05.20054775.
8. Коронавирус: демография, математика и модели распространения // РБК [Электронный ресурс, 11.03.2020]. - URL: https://www.rbc.ru/trends/futurology/5e73d8dd9a7947fad84a857e.

9. Якушова А. Аналитики создали модель распространения коронавируса в России // Ведомости [Электронный ресурс, 30.03.2020]. - URL: https://www.vedomosti.ru/society/articles/2020/03/30/826622-analitiki-sozdali-model-rasprostraneniya-koronavirusa-v-rossii.

10. Q-джер (блог). Математическая модель распространения коронавируса // Яндекс. Дзен [Электронный ресурс, 26.03.2020]. - URL: https://zen.yandex.ru/media/id/5c98f854e37d0600b354a18d/matematicheskaia-model-rasprostraneniia-koronavirusa-5e7c6c466ea28b34aa504b57.

11. https://coronavirus-monitoring.ru/.

12. https://www.worldometers.info/coronavirus/country/china/.

13. https://www.worldometers.info/coronavirus/country/russia/.

14. Первышева Е. Число умерших от коронавируса превысило 100 тысяч // Lenta.ru [Электронный ресурс, 17.04.2020]. - URL: https://lenta.ru/brief/2020/04/10/100k/.

15. ООН: пандемия может унести жизни до 3,3 млн жителей Африки // Коммерсантъ [Электронный ресурс, 17.04.2020]. - URL: https://www.kommersant.ru/doc/4325705.

16. Число жертв COVID-19 в Ухане после пересчета выросло на 1,2 тысячи // РИА Новости [Электронный ресурс, 17.04.2020]. - URL: https://news.mail.ru/incident/41423174/?frommail=1.

17. Разведка США предупредила НАТО и Израиль о пандемии коронавируса заранее // Lenta.ru [Электронный ресурс, 17.04.2020]. - URL: https://news.rambler.ru/world/44031940-razvedka-ssha-predupredila-nato-i-izrail-o-pandemii-koronavirusa-zaranee/?utm_source=news_media&utm_medium=main_now&utm_campaign=self_promo&utm_content=news_media&utm_term=pos_1.

18. Распространение коронавируса опережает выстроенную математическую модель [Электронный ресурс, 23.03.2020]. - URL: https://www.yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fvipdis.ru%2Frasprostranenie-koronavirusa-operezhaet-vystroennuyu-matematicheskuyu-model%2F.

19. Ученый: худшее ждет Россию на майские праздники [Электронный ресурс, 08.04.2020]. - URL: https://www.vazhno.ru/a/47778/20200408/uchenyj-hudshee-zhdet-rossiyu-na-majskie-prazdniki/ab-mt-novid/?rb_clickid=59111419-1587196156-1897391779&utm_campaign=25292490&utm_content=59111419&utm_medium=cpm&utm_source=mytarget.

20. Андреев В. Ученый, который предрек эпидемию COVID-19: судьба коронавируса в РФ решится в начале мая [Электронный ресурс, 16.04.2020]. - URL: https://wek.ru/uchenyj-kotoryj-predrek-yepidemiyu-covid-19-sudba-koronavirusa-v-rf-reshitsya-v-nachale-maya.

21. Товсепова Д. Ученые спрогнозировали пик эпидемии и отмену карантина в разных странах // rambler.ru [Электронный ресурс, 15.04.2020]. - URL: https://doctor.rambler.ru/coronavirus/44021918-uchenye-sprognozirovali-pik-epidemii-i-otmenu-karantina-v-raznyh-stranah/?utm_source=head&utm_campaign=self_promo&utm_medium=news&utm_content=news.

22. Коронавирус вписался в математическую модель: Какие прогнозы по распространению COVID-19 в России делают аналитики // Коммерсантъ [Электронный ресурс, 05.03.2020]. - URL: https://www.kommersant.ru/doc/4277027.

23. Cosimo Distante, Igor Gadelha Pereira, Luiz Marcos Garcia Gonçalves, Prisco Piscitelli, Alessandro Miani. Forecasting Covid-19 Outbreak Progression in Italian Regions: A model based on neural network training from Chinese data // BioRxiv, April 14, 2020. DOI: 10.1101/2020.04.09.20059055.

24. Diego Caccavo. Chinese and Italian COVID-19 outbreaks can be correctly described by a modified SIRD model// BioRxiv, March 23, 2020. DOI: 10.1101/2020.03.19.20039388.

25. «Немедленно прекратить безумие блефа коронавируса» // MIGnews.com [Электронный ресурс, 17.04.2020]. - URL: http://mignews.com/news/politic/world/170420_121722_00944.html?utm_source=smi2&utm_medium=exchange&utm_campaign=migru.